

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
_____ Кружаев В.В.
«___» _____ 2013

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

Исследование оптических свойств сетчатых метаматериалов с
фрактально-структурированной единичной ячейкой
(Заключительный)

Договор возмездного оказания услуг (выполнения работ, на создание произведения)
№1.2.2.3/33

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

И. А. Вайнштейн

Научный руководитель

(подпись, дата)

И. А. Вайнштейн

Исполнитель

(подпись, дата)

Д. В. Харитонов

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора:

Харитонов Дмитрий Валентинович

Kharitonov Dmitry Valentinovich

2. Аннотация:

В настоящей работе исследовались сетчатые метаматериалы с разработанной геометрией единичной ячейки на основе ковра Серпинского. Были обнаружены полосы отрицательного показателя преломления в ближнем ИК и видимом диапазоне. Наблюдалось линейное смещение спектральных особенностей в длинноволновую область с увеличением порядка фрактального разбиения. Обсуждались перспективы применения рассмотренных метаматериалов в оптических устройствах – фильтрах, линзах, модуляторах и т. д., а также высокочувствительных датчиках давления, биологических и химических сенсорах с возможностью дистанционного помехоустойчивого считывания показаний.

Fishnet metamaterials with proposed Sierpinski carpet geometry of unit cell were studied in this work. The spectral bands with negative refractive index were discovered in near-IR and visible regions. The linear red shift of spectral features was observed with the increasing partition order of fractal. We discussed the possible applications of analyzed metamaterials in optical devices (filters, lenses, modulators etc.), high-sensitive pressure meters, biomedical and chemical sensors capable of remote jam-resistant data acquisition.

3. Ключевые слова:

МЕТАМАТЕРИАЛЫ, ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ФРАКТАЛЫ, ОПТИЧЕСКИЙ МЕТАМАТЕРИАЛ, «ЛЕВОСТОРОННИЕ СРЕДЫ». METAMATERIALS, NEGATIVE REFRACTIVE INDEX, FRACTALS, OPTICAL METAMATERIAL, LEFT-HANDED MEDIUM

4. Тема отчета:

Исследование оптических свойств сетчатых метаматериалов с фрактально-структурированной единичной ячейкой.

Research on optical properties of fishnet metamaterials with fractal-structured unit cell.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	2
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ	6
2 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	8
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ	9
4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	11
5 АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	16
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Анализ соответствия программных комплексов электромагнитного моделирования поставленным задачам.....	17

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ИК – инфракрасный

КС – ковер Серпинского

ОПП – отрицательный показатель преломления

CST MWS – CST MICROWAVE STUDIO

FD – frequency domain, частотная область

FDTD – finite difference time domain method, метод конечных разностей во временной области

FIT – finite integral technique, метод конечных интегралов

FWHM – full width at half maximum, полуширина

TD – time domain, временная область

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря развитию технологий синтеза и конструирования наноразмерных структур стало возможным создание уникальных материалов, обладающих отрицательным показателем преломления в ближней ИК и видимой области спектра. В этой связи актуальными являются задачи оптимизации геометрии и поиска новых типов метаматериалов, позволяющих на существующей технологической базе обеспечить левосторонние свойства в коротковолновой области оптического спектра, минимизировать потери на стадии пропускания излучения, гибко изменять спектральный диапазон отрицательного преломления. Перспективными являются численное моделирование и анализ различной (регулярной, случайной, мультифрактальной) структуры метаматериалов.

Программные комплексы трехмерного численного моделирования электромагнитных полей основываются на решении системы уравнений Максвелла в различных точках пространства с последующей сшивкой промежуточных решений. Современные системы позволяют визуально конструировать сложную объемную структуру материалов, учитывают дисперсию их электромагнитных свойств в пределах широких частотных диапазонов.

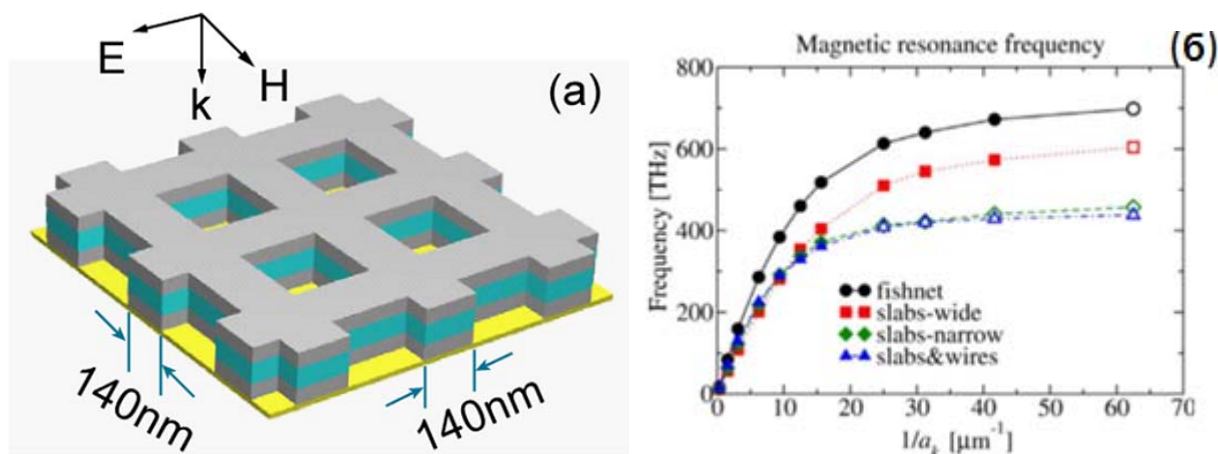
Целью настоящей работы являлась разработка новых структур фрактальных сетчатых метаматериалов с отрицательным показателем преломления и анализ их оптических свойств в ближней ИК и видимой области спектра.

Научная значимость выполняемой НИР связана с развитием представлений о влиянии нового геометрического параметра – порядка фрактального разбиения – на электромагнитные характеристики метаматериалов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Практическая значимость выполняемой НИР обусловлена возможностью задания требуемого рабочего диапазона длин волн на этапе синтеза метаматериалов за счет вариации геометрических параметров их структуры, в том числе порядка фрактального разбиения, позволяющей создавать на их основе оптические устройства – фильтры, линзы, модуляторы, переключатели, детекторы, а также высокочувствительные тензодатчики, биологические и химические сенсоры с возможностью помехоустойчивого дистанционного считывания показаний.

1 ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ

В широком смысле, термин «метаматериалы» применяют к материалам с искусственно созданной периодической структурой, характерный размер элементов которой значительно меньше длины волны излучения, на взаимодействие с которым рассчитан данный материал [1]. В настоящей НИР рассматривается класс левосторонних метаматериалов с отрицательным показателем преломления в определенном диапазоне длин волн — свойством, которым не обладает ни один из известных природных материалов, и в дальнейшем, для краткости, под термином «метаматериалы» будут подразумеваться электромагнитные левосторонние метаматериалы.

Прогресс последних лет в области нанотехнологий позволил конструировать оптические метаматериалы с отрицательным показателем преломления в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Впервые в видимой области спектра левосторонние свойства были показаны для сетчатого («fishnet») метаматериала, и до настоящего времени данная структура продолжает оставаться популярной благодаря относительной простоте изготовления методами нанолитографии и лучшим характеристикам по сравнению с другими металлодиэлектрическими структурами (рисунок 1).



а – геометрическая структура [2], б – зависимость частоты магнитного резонанса от размера единичной ячейки в сравнении с другими металлодиэлектрическими метаматериалами [3]

Рисунок 1 – Сетчатый метаматериал

Современные методы электронно- и ионно-лучевой литографии позволяют создавать наноструктуры с характерным размером особенностей порядка 10 нм, что делает возможным создание фрактальных структур для работы в видимой области. Таким образом, в настоящей работе исследуется влияние фрактальной модификации традиционного сетчатого метаматериала на его оптические свойства.

Частотно-избирательные свойства метаматериалов и возможность задания требуемого рабочего диапазона частот на этапе синтеза метаматериала позволяют использовать их для создания оптических устройств – фильтров, линз, модуляторов, переключателей, детекторов. На основе метаматериалов разработаны сверхбыстрые оптические переключатели и модуляторы, обеспечивающие более чем на порядок лучшую скорость переключения по сравнению с существующими традиционными устройствами [4]. Левосторонние метаматериалы могут применяться для улучшения характеристик (в первую очередь, разрешающей способности) оптических микроскопов, волноводов и лазерных резонаторов [5]. Главным ограничением на этом пути являются в настоящий момент значительные потери в метаматериалах.

Значительные успехи достигнуты в применении оптических метаматериалов в качестве основы для тензодатчиков. Механическое воздействие на метаматериал вызывает изменение его геометрии и, как следствие, сдвиг резонансной частоты. Высокая чувствительность, возможность бесконтактного получения информации и интеграции в фотонные устройства находят применение в задачах мониторинга вибрации в прецизионных приборах [6], точного измерения давления [7] и т. д.

Магнитный резонанс в метаматериалах чувствителен к изменению емкости конденсатора, составленного из металлических слоев, разделенных диэлектриком. Это свойство может использоваться в биологических и химических методах анализа. Главным преимуществом применения метаматериалов в химическом анализе является возможность целевого синтеза структуры для анализа конкретного требуемого вещества в определенной форме (рисунок 2). Использование многослойных структур и, соответственно, вовлечение большего объема анализируемого вещества может повысить чувствительность метода [8].

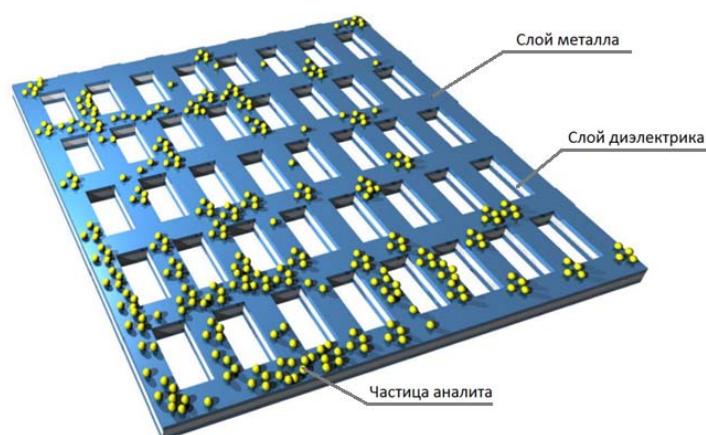


Рисунок 2 – Адсорбция вещества на внешней поверхности наномембраны из сетчатого метаматериала [8]

2 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализировались коммерческие программные продукты CST MICROWAVE STUDIO (в режимах расчета методом конечных интегралов во временной (TD) и частотной (FD) областях), LUMERICAL FDTD (осуществляющий расчеты методом конечных разностей во временной области (FDTD)) и бесплатный программный продукт с открытым исходным кодом теер (реализован метод конечных разностей во временной области (FDTD)).

В результате проведенного анализа и сопоставления программных комплексов был выделен набор критериев, на соответствие которым проверялся каждый продукт. Были рассмотрены лишь те методы расчета и функции программ, которые могли быть использованы для моделирования рассмотренных в данной работе структур метаматериалов на оптических частотах. Результаты сведены в таблицу, представленную в Приложении А.

Для определения популярности программных продуктов было проанализировано число научных статей, возвращаемых системой SCOPUS при поиске следующих фраз в заголовках, рефератах и текстах статей:

- «(optical) AND (Наименование программы)» — для определения количества статей, в которых упоминается моделирование с использованием данного продукта в оптическом диапазоне длин волн;
- «(metamaterial) AND (Наименование программы)» — для получения количества статей в системе, содержащих информацию о моделировании метаматериалов с использованием выбранного программного комплекса;
- «optical AND metamaterial AND (Наименование программы)» — представляет собой комбинацию двух приведенных выше запросов.

Результаты носят лишь оценочный характер, поскольку при поиске в системе SCOPUS не учитывается контекст, нахождение искомых слов в пределах одного раздела и т.д. Тем не менее, соотношение полученных результатов позволяет о популярности и применимости программных продуктов для решения рассматриваемых в настоящей дипломной работе задач.

По результатам сравнения существующих научно-ориентированных программных комплексов электромагнитного моделирования по разработанному перечню критериев, для выполнения модельных расчетов во временной области в настоящей работе выбран продукт CST MICROWAVE STUDIO.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

В качестве основы для построения геометрической структуры метаматериала был выбран ковер Серпинского. Рисунок 3 иллюстрирует процесс построения фрактала. Структура со слоями «металл-диэлектрик-металл» с единичной ячейкой в виде КС первого порядка представляет собой традиционный сетчатый метаматериал.

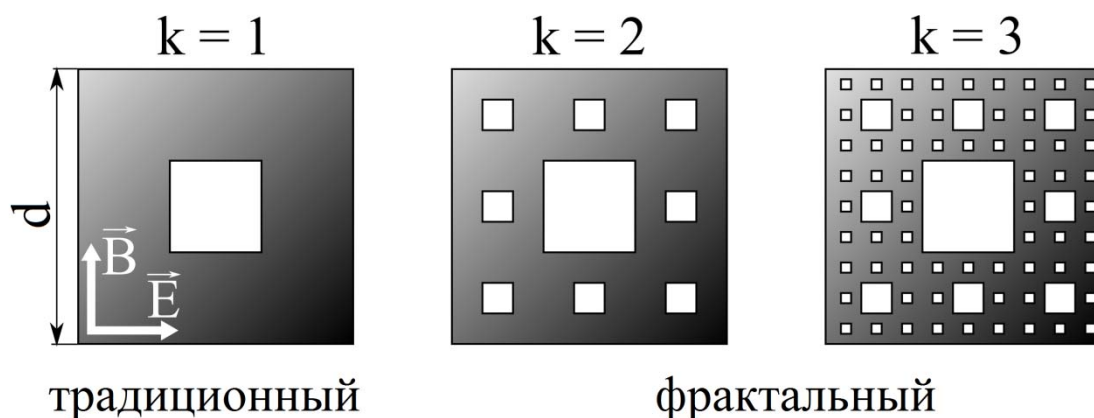


Рисунок 3 – Структура единичной ячейки традиционного и фрактального сетчатого метаматериала при различных порядках разбиения k

В настоящей работе была создана модель фрактального сетчатого метаматериала с геометрической структурой на базе КС. Единичная ячейка данного метаматериала для четвертого порядка разбиения фрактала и фрагмент структуры метаматериала для $k = 3$ показаны на рисунке 4. Материалы ($Ag-MgF_2-Ag$) и толщины слоев (40–17–40 нм) были выбраны в соответствии с моделью, описанной в [2], для которой ранее был получен отрицательный показатель преломления в видимой области спектра. Показанная структура метаматериала на основе ковра Серпинского k -го порядка разбиения здесь и далее обозначается как Ω_k .

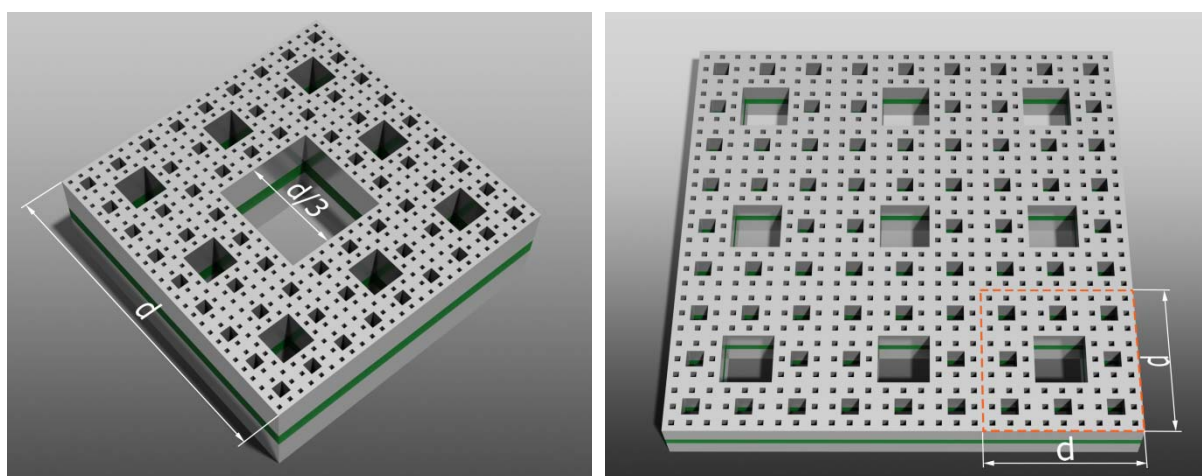
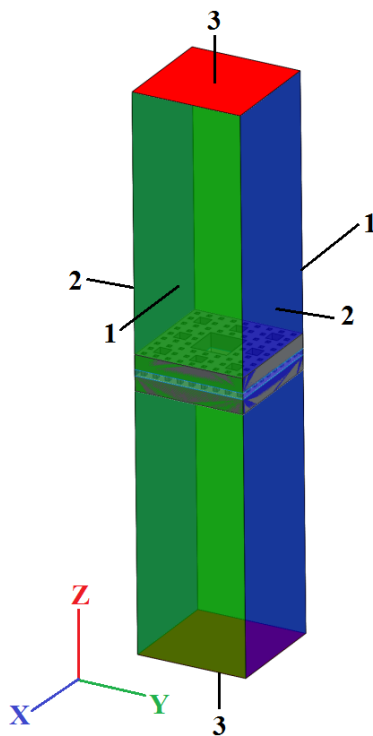


Рисунок 4 – Единичная ячейка фрактального сетчатого метаматериала ($k = 4$) и фрагмент структуры метаматериала с периодом d ($k = 3$)

Моделирование метаматериалов со структурой Ω_k с периодом $d = 300$ нм и порядком разбиения $k = 1 \div 4$ было проведено с использованием программного комплекса CST MICROWAVE STUDIO 2011 в режиме TD. Исследовалось взаимодействие с метаматериалом падающего излучения с длиной волны в диапазоне $375 \div 1600$ нм. Спектр комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{Ag}(\lambda)$ для слоя серебра был задан в соответствии с экспериментальными данными [9] с увеличенной в три раза мнимой частью, согласно [10]; показатель преломления для фторидного слоя принимался равным 1,38.

Была установлена область моделирования (рисунок 5), на ее гранях, перпендикулярных оси Z заданы открытые граничные условия, имитирующие распространение электромагнитных волн вдоль оси Z в неограниченном свободном пространстве. Также на этих гранях расположены волноводные порты: через верхний порт осуществлялся ввод плоской электромагнитной волны в виде модельного сигнала с гауссовой огибающей, распространяющейся перпендикулярно плоскости ячейки, и регистрация отраженного излучения; через нижний порт – регистрация прошедшего излучения. Расстояние между портами выбрано равным 8 мкм. На гранях области моделирования, перпендикулярных оси X , заданы условия идеальной электрической проводимости, оси Y – идеальной магнитной проводимости, таким образом, моделируется нормальное падение на бесконечный периодический метаматериал плоской электромагнитной волны.



1 – идеальный электрический проводник, 2 – идеальный магнитный проводник,
3 – открытая граница; волноводный порт

Рисунок 5 – Граничные условия на гранях области моделирования

4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результатом расчетов являются спектральные зависимости элементов матрицы рассеяния, имеющей вид [11]:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_1, a_2 – комплексные амплитуды падающих волн,

b_1, b_2 – комплексные амплитуды отраженных волн,

S_{ii} – коэффициенты отражения по амплитуде по i -му входу,

S_{ij} – коэффициенты передачи по амплитуде с j -го входа на i -ый выход.

В случае нормального падения плоской волны на поверхность эффективно однородной пластины толщиной h (рисунок 6) от источника, находящегося на первой (левой) поверхности пластины, S_{11} равен коэффициенту отражения по амплитуде, а S_{21} связан с коэффициентом прохождения по амплитуде T выражением [12]:

$$S_{21} = T \cdot e^{ik_0 h}, \quad (2)$$

где k_0 – волновое число падающей волны в свободном пространстве.

При выполнении моделирования фазы элементов матрицы рассеяния регистрируются в плоскостях мониторов поля, удаленных от поверхности метаматериала. Был проведен пересчет фаз, компенсирующий дополнительный набег фазы в пространстве между поверхностью метаматериала и монитором электромагнитного поля.

Расчет показателя преломления на основе полученных ранее спектральных зависимостей производился на основе метода, описанного в [12]. S -параметры связаны с показателем преломления n и импедансом z выражениями:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i \cdot 2nk_0 h})}{1 - R_{01}^2 e^{i \cdot 2nk_0 h}}, \quad (3)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{ink_0 h}}{1 - R_{01}^2 e^{ink_0 h}}, \quad (4)$$

где h – толщина однородной пластины;

n – комплексный показатель преломления пластины;

k_0 – волновое число падающей волны в свободном пространстве;

$R_{01} = z - 1 / z + 1$ – коэффициент отражения границы воздух-метаматериал.

Учитывая, что рассматриваемый метаматериал представляет собой пассивную среду вне резонансных пиков, и используя условия непрерывности функций $\varepsilon''(\lambda)$ и $\mu''(\lambda)$, получаем однозначно определенную функцию $n'(\lambda)$ в диапазоне длин волн, в котором для метаматериала выполняется приближение эффективной среды.

Установлено, что для рассматриваемых структур фрактальных сетчатых метаматериалов с периодом $d = 300$ нм и порядком фрактального разбиения $k = 1 \div 4$ в видимой и ближней ИК-области спектра наблюдается две полосы отрицательного преломления. Параметры пиков представлены в таблице 1, пример спектральной зависимости $n'(\lambda)$ — на рисунке 7.

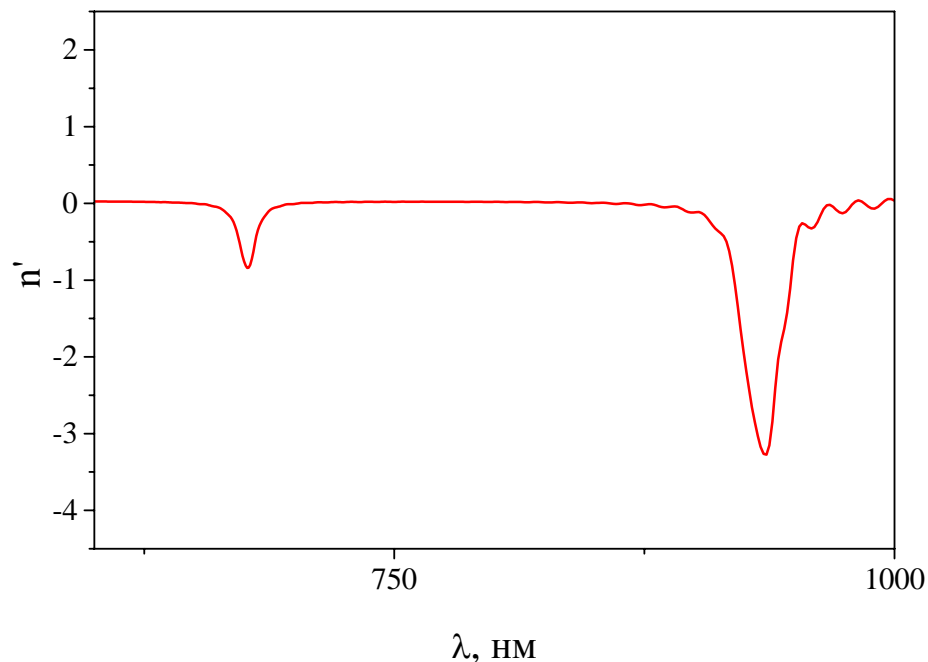


Рисунок 7 — Спектральная зависимость действительной части показателя преломления для структуры с периодом $d = 300$ нм, порядком фрактального разбиения $k = 3$

Таблица 1 – Параметры пиков ОПП для метаматериалов со структурой Ω_k и $d = 300$ нм

Порядок разбиения k	Положение минимума пика λ_{min} , нм		Полуширина пика $FWHM$, нм		Амплитуда пика $-n_{min}$	
	1 пик	2 пик	1 пик	2 пик	1 пик	2 пик
1	869,6	632,2	26,0	10,8	3,96	1,58
2	901,5	653,5	23,6	8,4	3,61	1,02
3	928,1	675,1	20,3	9,3	3,3	0,80
4	949,4	694,4	19,5	9,3	3,23	0,60

5 АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Двухпиковые конфигурации спектральных зависимостей $n'(\lambda)$ уже наблюдались ранее для традиционных структур сетчатых метаматериалов [13], причем соотношение амплитуд пиков ОПП зависело от соотношения длин сторон отверстия в единичной ячейке [13]. С увеличением порядка фрактального разбиения монотонно уменьшается амплитуда и полуширина пиков ОПП, наблюдается их сдвиг в длинноволновую область. Амплитуда второго пика, расположенного в более коротковолновой области, более чувствительна к изменению k .

В результате анализа всей совокупности полученных данных были построены графики зависимостей положения минимумов пиков ОПП от порядка фрактального разбиения структуры (рисунок 8).

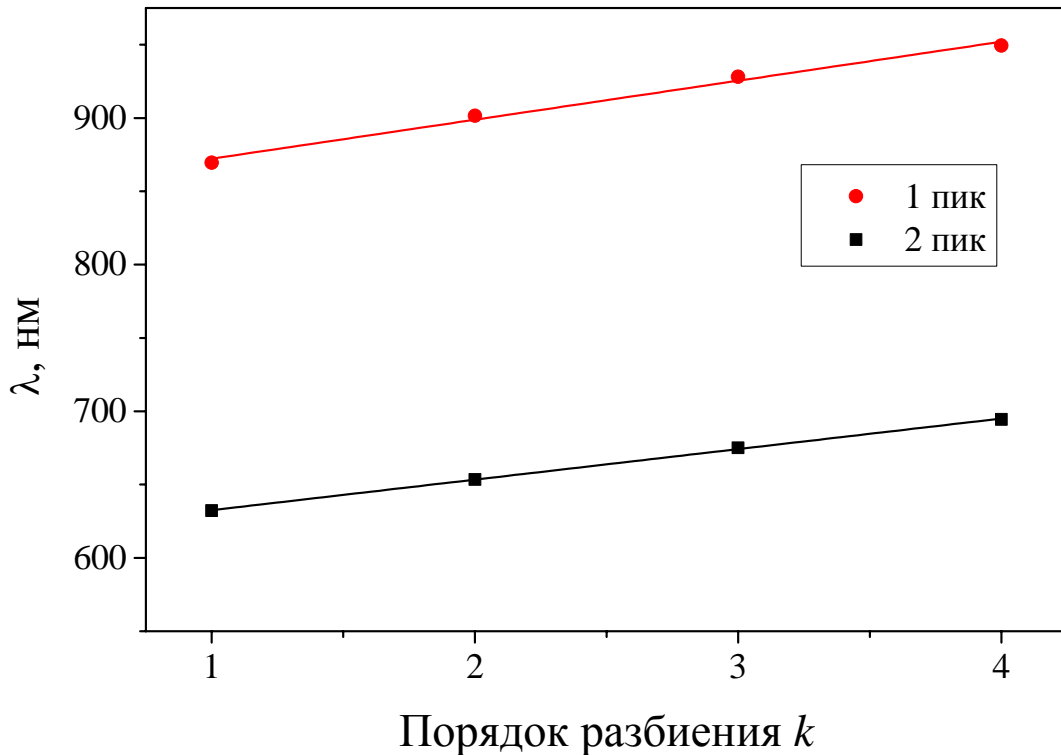


Рисунок 8 — Зависимость положения минимумов пиков отрицательного показателя преломления от порядка разбиения k структуры Ω_k с периодом $d = 300$ нм

Как показано на рисунке 8, сдвиг пиков отрицательного преломления в длинноволновую область спектра при изменении порядка разбиения фрактальной структуры Ω_k имеет близкий к линейному характер. Угол наклона аппроксимирующей прямой для 1 пика составляет приблизительно 27 нм/порядок, для 2 пика — 21 нм/порядок. Амплитуда вто-

рого пика значительно уменьшается с ростом порядка фрактального разбиения, что, наряду с технологическими трудностями, делает нецелесообразным использование фрактальных сетчатых метаматериалов с большими k .

Ранее в независимых литературных источниках было экспериментально [14] и теоретически [3] показано, что для различных типов метаматериалов в рассматриваемом диапазоне длин волн с увеличением периода структуры наблюдается близкий к линейному сдвиг пиков отрицательного показателя преломления.

Таким образом, изменение периода и порядка разбиения фрактальной структуры может быть использовано для дискретной и непрерывной регулировки положения пиков ОПП. Изменение размеров отверстий при вариации k также позволит регулировать чувствительность химических сенсоров на основе фрактальных метаматериалов к требуемому веществу в определенной форме.

Как упоминалось в разделе 3, при разработке расчетных моделей в данной работе использовались увеличенные в 3 раза экспериментальные значения $\varepsilon''(\lambda)$, полученные для макроскопически больших образцов из серебра [9]. Согласно [10], для серебряных полосок шириной менее 100 нм длина свободного пробега электронов проводимости на поверхности металла становится сравнимой с размером полосок, что приводит к значительному увеличению частоты столкновений, росту ε'' и, следовательно, потерь. Выбранное трехкратное увеличение ε'' , в соответствии с [10], справедливо для серебряных полосок шириной от 50 до 120 нм, для меньших значений ширины ε'' может увеличиваться в 5 и более раз по сравнению с экспериментальными данными для макроскопически больших образцов. Дополнительный вклад в потери вносит шероховатость поверхности серебра и дефекты изготовления метаматериала. Для некоторых разработанных моделей поперечные размеры части элементов оказывались менее 50 нм, таким образом, потери в изготовленных метаматериалах с подобной структурой могут превышать расчетные, в особенности, для малых периодов структуры и больших значений порядка разбиения k . Поэтому при производстве метаматериалов для повышения точности расчета их характеристик необходимо скорректировать $\varepsilon''(\lambda)$ на основе экспериментальных данных, полученных для тестовых образцов с соответствующими характерными размерами структуры.

Различие реальных и использованных в расчетных моделях зависимостей $\varepsilon''(\lambda)$ приведет к несоответствию амплитуды пиков ОПП, но не изменит их положения. Соответственно, останутся справедливыми зависимости положений пиков отрицательного показателя преломления от порядка фрактального разбиения, полученные в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящей НИР был проведен литературный обзор программных комплексов трехмерного электромагнитного моделирования; на основе сравнения по разработанному перечню критериев для выполнения расчетов во временной области был выбран научно-ориентированный программный комплекс трехмерного электромагнитного моделирования CST MICROWAVE STUDIO.

Была разработана фрактальная структура сетчатого метаматериала на основе ковра Серпинского. Для модельных структур с порядком фрактального разбиения $k = 1 \div 4$ и периодом $d = 300$ нм в диапазоне длин волн $\lambda = 375 \div 1500$ нм были рассчитаны элементы матрицы рассеяния, количественно описывающие процессы взаимодействия оптического излучения с конденсированными средами.

Для всех анализируемых метаматериалов в видимом и ИК-диапазоне спектра наблюдались два пика отрицательного показателя преломления. Наименьшее значение ОПП: $n_{min} = -3,96$. Установлено, что для данных структур с увеличением порядка фрактального разбиения k наблюдается линейный сдвиг оптических особенностей в длинноволновую область.

Полученные в работе линейные зависимости положения пиков ОПП от геометрических параметров метаматериалов могут использоваться для настройки спектрального положения оптических особенностей при производстве сетчатых метаматериалов с заданными функциональными характеристиками.

Результаты НИР были представлены на XXI Международном симпозиуме «Наноструктуры: физика и технология» (г. Санкт-Петербург, Россия) [15].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sihvola, A. Metamaterials in electromagnetics / A. Sihvola // *Metamaterials*. – 2007. – Vol. 1, № 1. – P. 2–11.
2. Xiao, S. et al. Yellow-light negative-index metamaterials. / S. Xiao et al. // *Optics letters*. – 2009. – Vol. 34, № 22. – P. 3478–3480.
3. Penciu, R.S. et al. Magnetic response of nanoscale left-handed metamaterials / R.S. Penciu et al. // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81, № 23. – P. 1–11.
4. Azad, A.K. et al. Ultrafast optical control of terahertz surface plasmons in subwavelength hole arrays at room temperature / A.K. Azad et al. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95, № 1. – P. 011105.
5. Smolyaninov, I. Hung, Y.-J. & Davis, C. Imaging and focusing properties of plasmonic metamaterial devices / I. Smolyaninov, Y.-J. Hung, C. Davis // *Physical Review B*. – 2007. – Vol. 76, № 20. – P. 1–7.
6. Xu, X. et al. Flexible visible-infrared metamaterials and their applications in highly sensitive chemical and biological sensing. / X. Xu et al. // *Nano letters*. – 2011. – Vol. 11, № 8. – P. 3232–3238.
7. Aylo, R. et al. Design of metamaterial based sensors for pressure measurement / R. Aylo et al. // *Proc. SPIE 7604, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIV*. / ed. Broquin J.-E., Greiner C.M. – 2010. – Vol. 7604, № 937. – P. 760412.
8. Jakšić, Z. et al. Negative Refractive Index Metasurfaces for Enhanced Biosensing / Z. Jakšić et al. // *Materials*. – 2010. – Vol. 4, № 1. – P. 1–36.
9. Johnson, P.B. & Christy, R.W. Optical Constants of the Noble Metals / P.B. Johnson, R.W. Christy // *Physical Review B*. – 1972. – Vol. 6, № 12. – P. 4370–4379.
10. Drachev, V.P. et al. The Ag dielectric function in plasmonic metamaterials. / V.P. Drachev et al. // *Optics express*. – 2008. – Vol. 16, № 2. – P. 1186–1195.
11. Smith, D.R. et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials / D.R. Smith et al. // *Physical Review E*. – 2005. – Vol. 71, № 3. – P. 036617.
12. Chen, X. et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials / X. Chen et al. // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70, № 1. – P. 016608.
13. García-Meca, C. et al. Double-negative polarization-independent fishnet metamaterial in the visible spectrum. / C. García-Meca et al. // *Optics letters*. – 2009. – Vol. 34, № 10. – P. 1603–1605.
14. Nikolaenko, A.E. et al. Carbon Nanotubes in a Photonic Metamaterial / A.E. Nikolaenko et al. // *Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 104, № 15. – P. 153902.
15. Kharitonov, D. V. & Weinstein, I.A. Optical properties of layered metamaterials with Sierpinski carpet structure / D. V. Kharitonov, I.A. Weinstein // 21st Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Saint-Petersburg, Russia. – June 24-28, 2013. – P. 334–335.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Анализ соответствия программных комплексов электромагнитного моделирования поставленным задачам

Таблица А.1 – Анализ соответствия программных комплексов поставленным задачам

Наименование программного комплекса	CST MWS		Lumerical FDTD	meep
Метод расчета	FIT TD	FEM FD	FDTD TD	FDTD TD
Графический интерфейс	+		+	-
Конструирование моделей сложной геометрической формы	+		+/-	-
База свойств материалов на оптических частотах	-		+	-
Адаптивное разбиение на оптических частотах	+/-	+/-	+	-
Периодические граничные условия	+/-	+	+	-
Скриптовый язык (конструирование структуры)	+		+/-	+
Скриптовый язык (обработка результатов)	+		+	+
Параллелизация расчетов и использование графических ускорителей	++		+-	-
SCOPUS: optical	442		244	293
SCOPUS: metamaterial	211		16	13
SCOPUS: optical metamaterial	46		9	10